

半無限不均質弾性媒質における地震波エンベロープ 形成の理論的研究

著者	前田 拓人
号	49
学位授与番号	2246
URL	http://hdl.handle.net/10097/39297

氏名・（本籍）	まえ だ たく と 前 田 拓 人
学位の種類	博士（理 学）
学位記番号	理博第2246号
学位授与年月日	平成18年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）地球物理学専攻
学位論文題目	半無限不均質弾性媒質における地震波エンベロープ形成の理論的研究
論文審査委員	（主査） 教授 佐藤 春 夫 教授 長谷川 昭，海野 徳 仁 助教授 西村 太 志，松 澤 暢

論 文 目 次

謝辞

概要

第1章	序論
1.1	短波長不均質構造とコーダ波励起に関する従来の研究
1.2	本研究の目的
第2章	半無限不均質構造における弾性波散乱
2.1	Born近似による散乱波の表現
2.2	実体波散乱のモデル化
2.3	Rayleigh波からRayleigh波への散乱
2.4	Rayleigh波から実体波への変換散乱とその解釈
2.5	実体波からRayleigh波への変換散乱と地表反射の影響
2.6	まとめ
第3章	ランダム不均質媒質中の散乱係数の統計的導出
3.1	不均質構造の統計的表現
3.2	S波偏極を考慮した実体波の散乱係数
3.3	Rayleigh波および変換散乱の散乱係数
3.4	後方散乱係数の比較
3.5	まとめ
第4章	エンベロープ合成
4.1	震源からの輻射
4.2	3成分地震波エンベロープの導出
4.3	等時散乱曲線に沿った積分
4.4	エンベロープの数値合成例
4.5	まとめ

第5章	議論
5.1	内部減衰と散乱減衰
5.2	Rayleigh波の卓越する条件
5.3	今後の展望
第6章	結論
Appendix	
記号一覧	
参考文献	

論文内容要旨

広帯域地震観測点の稠密化によって地下の不均質構造の推定がより詳細なスケールで行われるようになり、地震波動伝播のモデルをより精緻化することが求められている。特に近地地震のコーダ波は、リソスフェアのランダムな不均質構造による散乱を最も直接的に反映するものと解釈され、不均質構造の短波長スペクトル成分に着目したコーダエンベロープのモデル化が精力的に行われてきた。ところが、理論モデルの対象は主に1Hz以上の高周波であり、0.1Hzから1Hzまでの周波数帯はコーダ波解析の空白地帯になっていた。この周波数帯のコーダ波には、震源で励起される、あるいは散乱されて生ずる表面波の存在が過去の現象論的研究から示唆されてきた。しかし、表面波の散乱問題は主に20s以上の長周期帯において決定論的に取り扱われてきており、位相を追うことが困難になる短周期帯での表面波の散乱波と地下の不均質構造と結びつける定量的なモデルは確立されていなかった。そこで、本研究では表面波の存在するもっとも単純な構造である半無限弾性媒質に重畳したランダムな不均質構造の下で表面波の散乱問題を統計的に取り扱い、実体波のみならずRayleigh波を含めた変換散乱の素過程をBorn近似に基づいて統一的に記述し、ダブルカップル型震源から輻射される地震波の3成分波形エンベロープの理論的導出を行った。

第1章では、ランダムな短波長不均質構造の存在の実証と、散乱に着目した地震波エンベロープの多様なモデル化の試みについて過去の研究を概観し、本論文の目的と構成を記した。

第2章では、地震波の波長よりも大きなブロック内に局在した不均質構造を考え、そこに入射する波によって生ずる散乱波を摂動論の一種であるBorn近似を用いて決定論的に定式化した。特に、半無限媒質における地震波動場を実体波とRayleigh波の和で表現することで、Rayleigh波からRayleigh波の散乱のみならず、実体波とRayleigh波間の変換散乱を自然に導入できることが明らかになった。さらに、散乱地震波の振幅は、散乱の方位依存性を特徴づける散乱の基本パターンと地震波速度の背景媒質からのゆらぎとの積のFourier変換の形式で表現されることを示した。また、実体波の散乱については、 SV と SH の偏極方向を新たに考慮し、散乱振幅の表現を整理した。さらに、Rayleigh波固有関数は深さの増大と共に急激に減衰するため、Rayleigh波の散乱は不均質構造がRayleigh波の波長よりも浅い位置にあるときのみ起こると近似できることが明らかとなった。Rayleigh波から実体波への変換散乱では、単一ブロック内でも深さと共に散乱の基本パターンが急激に変化することも示された。これはRayleigh波固有関数の水平動と上下動のアスペクト比の変化によるためであり、散乱の基本パターンは、水平に入射する P 波と SV 波の実体波散乱の基本パターンとRayleigh波固有関数との重み付き和で近似的に表されることを明らかにした。

第3章では、ランダムな不均質構造のアンサンブル概念を導入し、その構造をパワースペクトル密度関数(PSDF)で統計的に記述した。さらに、入射波と散乱波のエネルギー流束密度の比から散乱断面積と

散乱係数を定義し、そのランダム不均質構造のPSDFへの依存性を理論的に明らかにした。それにより、実体波の散乱係数は、散乱の基本パターンの2乗とPSDFの角度依存性との積で表されることを示した。特に、SV波とSH波の散乱の基本パターンを用いてS波の偏極方向を適切に考慮することで、従来不可能だった散乱波の単一成分の2乗振幅を散乱係数を用いて表現することが可能になった。また、Rayleigh波の場合、散乱係数は速度ゆらぎのパワースペクトル密度関数の深さ方向へのFourier変換と、散乱の基本パターンとの積の深さ積分で表されることを示した。さらに、Rayleigh波の場合は実体波とは異なり、長波長での極限を除いて、ランダムな不均質構造と波動方程式から決まる散乱の基本パターンとを代数的に分離することはできないということが明らかになった。

続いて、相関距離 $a=2$ km、速度ゆらぎの大きさのRMS量 $\epsilon=10$ %の指数型の自己相関関数で特徴づけられるランダム媒質を仮定し、後方への散乱係数の周波数依存性を散乱モード毎に比較した。その結果、Rayleigh波からRayleigh波へ、あるいはRayleigh波から実体波への変換散乱係数は実体波の散乱係数と同程度の大きさであることが明らかになった。

第4章では、全空間に分布した不均質構造を多数のブロックに分割し、すべてのブロックからの1次散乱波のエネルギーを非干渉性の仮定の下で足し合わせることで、3成分地震波形エンベロープの理論合成を行った。震源はダブルカップル型震源による非等方な地震波エネルギー輻射を考え、地震波散乱は第3章で導出された非等方性を持つ散乱係数で記述した。その結果、時間領域の速度振幅の2乗平均 (MS) エンベロープは、震源で輻射されるエネルギースペクトルと輻射パターン、震源から散乱体までの幾何減衰、輻射された波の伝播速度と散乱点における散乱係数、散乱体から観測点までの幾何減衰の積を、ある経過時間のエンベロープに寄与する散乱体の空間分布（等時散乱曲面・曲線）に沿って空間積分することで得られることを示した。ただし、散乱波がRayleigh波の場合は、地表観測点での2乗振幅は深さ方向に分布するRayleigh波エネルギーの一部であることに由来する係数がかかることも明らかになった。

MSエンベロープ形状の周波数依存性と、そこへのRayleigh波散乱波の寄与を定量的に明らかにするため、第3章で用いた半無限ランダム媒質における3成分MSエンベロープを数値計算した。計算には地中での実体波の散乱の他、地表で一度反射した後に地中で散乱されるエネルギーを考慮し、Rayleigh波の散乱を加えた合計17散乱モードのエンベロープへの寄与を評価した。等時散乱曲面（線）は、時間と空間を引数にもつデルタ関数で表されるが、これは実体波の場合には扁長楕円体座標系と球座標系の組み合わせで、Rayleigh波の場合には楕円座標系でそれぞれ解析的に積分できることを示した。

数値計算されたMSエンベロープは、低周波になるほど、あるいは震源が浅くなるほど実体波に比べて幾何減衰の小さな散乱Rayleigh波の寄与が大きくなる。これは、過去に現象論的な解析で指摘されていたコーダ波へのRayleigh波散乱波の存在を理論的に示すものである。また、S波からRayleigh波への変換散乱波もS波直達波着信前後で非常に強い振幅を持つ。だが、MSエンベロープ振幅の時間減衰は経過時間の-4乗と非常に強いため、コーダ波後半部分にはほとんど寄与しないことが明らかになった。

第5章では、Rayleigh波散乱波のコーダ波への卓越条件について考察した。第4章で計算されたMSエンベロープは厳密なものであるが、実用的な観点からは震源深さと周波数の関数として、どの程度の経過時間からRayleigh波の散乱波がコーダ波に卓越するかを判定することには意義があると考えられる。そこで、震源と観測点が同地点にあるという単純化された1次後方散乱モデルを用いて、周波数と震源によってRayleigh波の散乱波によるエンベロープ振幅がSS散乱波によるものよりも大きくなるRayleigh波の卓越経過時間を導出した。また、第5章では1次散乱の適用限界や本研究で考慮されなかった減衰の効果など、数理的な問題点と今後の研究課題についても議論した。

本研究では、ランダムな半無限不均質弾性媒質を伝わる地震波の3成分平均2乗振幅エンベロープの理論合成に取り組み、これまでの研究では考慮されていなかったRayleigh波の散乱を厳密に取り入れた定式

化に初めて成功した。また、実体波とRayleigh波の変換散乱の素過程に関する不均質なゆらぎのスペクトルを用いた表現を得た。自由表面（地表）の存在に伴い必然的に生じるRayleigh波を厳密に考慮した地震波エンベロープの理論モデルは本研究によって初めてなされたことであり、実体波と表面波の寄与が混在するような周波数帯域においてリソスフェアのランダム不均質に起因する近地地震のコーダ波形成を研究するための数理的基盤を提供することができた。これを基礎として、深さに依存する速度構造の導入やそれに伴うLove波の散乱を考慮した散乱モデルへの拡張と広帯域地震波のエンベロープ解析を進めることで、地球内部の短波長不均質構造のより詳細な姿を明らかにすることが可能になるであろう。

論文審査の結果の要旨

近地地震の記録に見られる直達波の後ろに続く波群はコーダ波と呼ばれ、その位相は一見ランダムであるが振幅エンベロープは時間経過と共に滑らかに減少する。1Hz以上の周波数帯域でのコーダ波については、リソスフェアのランダムな不均質構造によって散乱されたS波の非干渉的な総和と考える統計的モデルが提唱されている。より低い0.1-1Hzといった帯域でもコーダ波は滑らかなエンベロープを持ち、表面波の散乱の寄与も指摘されているが、実体波と表面波の混在する系を取り扱うモデルはこれまで確立されていない。前田拓人執筆の論文は、上記の視点から、自由表面を持つランダム弾性媒質における地震波の3成分波形エンベロープの数理的導出に取り組んだ。

論文は、局在する不均質による延べ17の実体波とレーリー波の散乱モードについて、ボルン近似を用いてP, SV, SH偏向成分を用いた散乱振幅の表現を導いた。次に、ランダム媒質のアンサンブルを考え、その統計平均から各散乱モードについて単位体積(または単位面積)当たりの散乱の強さを導出した。散乱は一般に周波数に依存し非等方的であり、実体波—実体波散乱は媒質のいたる所で生じるが、レーリー波と実体波の変換散乱は地表からせいぜい半波長程度の深さでのみ生じることを導いた。次に、オメガ²乗モデルのスペクトルを持つダブルカップル型震源を、弾性係数のゆらぎが指数関数型自己相関関数で統計的に記述される半無限ランダム弾性媒質中に置き、地表における速度2乗振幅エンベロープを理論的に導出した。このモデルは、高周波数域では一般にS波散乱が卓越すること、低周波数域では直達S波の着信直後にS波散乱が卓越するが時間経過と共にレーリー波散乱が卓越することを導いた。レーリー波散乱がS波散乱をしのぐ条件を定量的に求めることにも成功している。

この論文は、レーリー波を厳密に考慮した3成分波形エンベロープを初めて理論的に合成したものであり、リソスフェアのランダム不均質を研究するための数理的基盤を提供するものである。本論文は、前田拓人が今後自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、前田拓人提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。